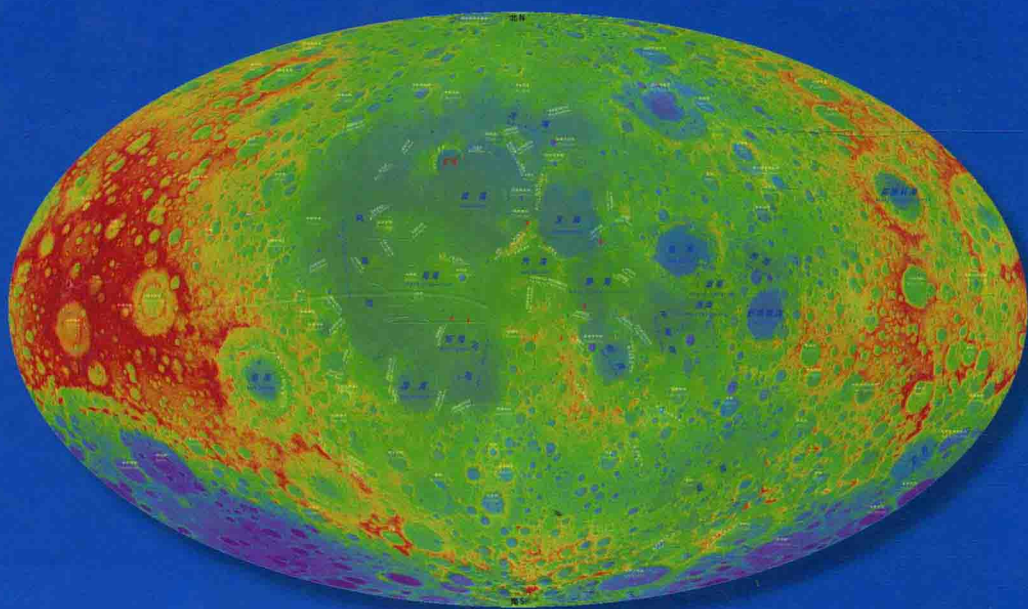


月球地质研究与编图

陈建平 丁孝忠 王翔 等编著



地质出版社

月球地质研究与编图

陈建平 丁孝忠 王 翔
岳宗玉 许延波 韩坤英 编著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系统阐述了月球大地构造纲要图与月球地质图的编图系统工程设计方案、编制方案,从开展月球数字地质编图的目的、意义和在月球数字地质编图中建立的编图方案和遵循参考的引用标准,到前期的数据资料收集和准备工作,建立月球地质编图数据源信息分类。在充分调研国内外月球地质编图进展的基础上,开展基于构造要素、物质类型、构造单元、地层时代的分类和演化成因分析,分别确立不同地质单元类型的划分方法,并完成相关要素的结构设计,建立月球地质编图标准。在 GIS 数字化环境下完成月球大地构造纲要图与月球地质图的建库和编制。

本书可供从事月球地质研究与编图的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

月球地质研究与编图 / 陈建平 等编著. —北京:
地质出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-116-08933-4

I. ①月… II. ①陈… III. ①月球结构—研究②月球
图—地质图—编制 IV. ①P184

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 187597 号

Yueqiu Dizhi Yanjiu yu Biantu

责任编辑:刘亚军 邱殿明

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324578(编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)82324578

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787mm×1092mm^{1/16}

印 张:15

字 数:375 千字

版 次:2014 年 10 月北京第 1 版

印 次:2014 年 10 月北京第 1 次印刷

定 价:120.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-08933-4

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

我衷心地祝贺《月球地质研究与编图》在依托嫦娥工程、充分借鉴国外其他国家探月成果的基础上出版问世，完成我国第一本关于月球地质图编制规范和标准的专著，为我国下一步应用嫦娥工程数据开展“全月球地质图”编制，以及未来其他天体的地质编图工作奠定了基础，衷心感谢这本书的作者以及为此书付出汗水的年轻科学家，正是你们用敢于探索的信心和勇气，为我国探月事业做出了贡献。

月球地质图是将不同时代形成的岩石建造、地质构造等的地质体、地质现象，用一定图例表示在某种比例尺地形图上的一种图件，是表示月球地壳表层岩相、岩性、地层年代、地质构造、岩浆活动、矿产分布等的地图的总称。对于月球地质图件编制，自20世纪60年代开始，国际上已经就月球构造展开了广泛的研究，但由于观测手段、数据条件的限制，没有全面、系统地编制月表地质图和构造纲要图，直到阿波罗计划实施。20世纪70~80年代，美国科学家利用阿波罗计划的成果，开展了全月球地质图件的系统编制，获得了不同比例尺月球地质图件，但未能形成统一的编图标准和规范。《月球地质编图与研究》是在我国探月工程不断推进、探测数据研究工作不断深入的情况下完成的，必将推动我国月球及行星科学的研究。与此表示祝贺的同时，希望中国地质大学（北京）、中国地质科学院的科学家们在总结经验、不断创新的同时，担负起培养优秀人才的使命，使我国行星地质研究的队伍逐渐发展壮大起来，并形成相应的研究基地。

我国月球探测工程起步晚，但一定要充分借鉴已有的月球探测工程的经验，充分发挥我国科学家的聪明才智，力求高起点进入国际主潮流，形成自己的特色，在月球探测与月球科学研究中做出中国人应有的贡献。

愿《月球地质研究与编图》一书在我国探月征程上发挥更大的作用。

欧仁·梅耶
二〇一四年四月四日

目 录

序

1 绪论	(1)
1.1 研究概述	(1)
1.2 目的与意义	(3)
1.3 本书章节说明	(4)
2 国内外月球地质编图进展	(6)
2.1 月球构造图编图进展	(6)
2.2 月球地质图编图进展	(10)
3 月球地质编图使用的数据	(17)
3.1 底图数据和要素	(17)
3.1.1 底图数据	(17)
3.1.2 底图要素	(17)
3.2 使用数据源	(17)
3.3 参考地质图件	(20)
4 嫦娥探月数据研究	(27)
4.1 CCD 数据	(27)
4.2 IIM 数据	(29)
4.3 LAM 数据	(36)
4.3.1 激光点云数据生成月球 DEM 方法	(37)
4.3.2 月表 CCD 立体影像生成方法	(37)
5 数字探月研究	(73)
5.1 构造行迹	(73)
5.1.1 概述	(73)
5.1.2 基于影像特征的撞击坑检测与提取方法	(74)
5.1.3 联合月面 DEM 与影像数据的撞击坑提取方法	(80)
5.1.4 撞击坑形态	(81)
5.2 三维数字月球	(81)
5.2.1 构建全月球虚拟现实	(81)
5.2.2 全月球虚拟现实应用于月球研究	(82)
5.2.3 发挥虚拟现实的特点开展科学研究	(82)
5.2.4 月球三维模型的构建过程	(82)

5.2.5	描述月球表面的三维坐标系	(83)
5.2.6	月球三维模型中的空间索引	(86)
5.2.7	月球三维模型的坐标换算	(87)
5.2.8	全月球虚拟现实应用	(87)
5.3	奇异数据与分析	(92)
6	月球地质图编制	(99)
6.1	基本研究思路	(99)
6.2	地质图年代划分	(99)
6.3	数字地质编图规范和标准	(100)
6.3.1	参考资料及应用标准	(100)
6.3.2	地质图制图要求和方法	(100)
6.3.3	地质图数据库	(106)
6.3.4	元数据	(108)
7	月球构造纲要图编制	(110)
7.1	基本思路与原则	(110)
7.1.1	月球构造纲要图编制的基本思路	(110)
7.1.2	月球构造纲要图的编制原则	(110)
7.2	月球构造要素	(112)
7.2.1	环形构造	(112)
7.2.2	线性构造	(116)
7.2.3	地体构造	(121)
7.2.4	盆地构造	(124)
7.3	构造单元划分及边界性质确定的标准	(126)
7.3.1	构造单元划分的具体标准	(126)
7.3.2	边界性质的确定	(127)
7.4	时代划分方案	(127)
7.4.1	月球时代确定方法综述	(128)
7.4.2	国内外公认的月球地质历史分期	(141)
7.4.3	各构造要素形成时代的确定	(142)
7.5	月表物质类型划分方案	(142)
7.5.1	月球主要矿物组分与物质类型	(142)
7.5.2	月表矿物组分分布	(144)
7.5.3	月表物质类型划分方案	(164)
8	数字地质编图规范标准	(168)
8.1	国内外编图规范概述	(168)
8.1.1	典型的地球区域构造纲要图	(168)
8.1.2	月球区域构造纲要图	(169)
8.2	月球构造纲要图编图规范及标准	(169)
8.2.1	参考标准	(169)
8.2.2	编图平台: ArcGIS	(170)

8.2.3	底图及其坐标系统、投影方式的确定	(170)
8.2.4	图例图示的制定	(170)
8.3	编图流程	(173)
9	月球典型区域研究	(174)
9.1	月球地质图研究	(174)
9.1.1	区域地质背景	(175)
9.1.2	月球撞击坑及溅射堆积物的划分	(176)
9.1.3	地层划分	(181)
9.1.4	月海、月陆玄武岩的划分	(183)
9.1.5	区域构造特征及演化	(184)
9.2	月球构造纲要图	(188)
9.2.1	区域地质背景	(188)
9.2.2	LQ-4 地区的影像特征、地形地貌特征、化学组成特征	(189)
9.2.3	各类构造要素的解译与构造解析	(195)
9.2.4	构造单元划分与时代确定	(202)
9.2.5	LQ-4 地区构造纲要图	(206)
9.3	月球构造演化	(206)
10	月球地质编图与月球探索成果空间数据库	(210)
10.1	月球科学数据特点	(210)
10.2	系统总体设计	(211)
10.2.1	系统目标	(212)
10.2.2	系统功能模块设计	(213)
10.2.3	系统体系结构设计	(213)
10.3	关键技术及技术框架	(214)
10.3.1	原始数据存储方案	(214)
10.3.2	ArcSDE 空间数据库引擎	(214)
10.3.3	三维虚拟月球	(215)
10.4	系统主要功能的实现	(215)
10.4.1	数据管理子系统	(215)
10.4.2	虚拟月球	(217)
10.4.3	项目管理	(219)
10.5	探月资料数据库	(220)
10.5.1	技术路线	(220)
10.5.2	月球数据管理思路	(220)
10.5.3	技术方法	(220)
11	结束语	(224)
	参考文献	(225)

1 绪 论

1.1 研究概述

人类利用遥感技术开展对月资源勘查始于 20 世纪 70 年代, 美国的阿波罗 15、16 号首次利用 γ 谱仪和 X 射线荧光对月球赤道附近小区域内的 Fe、Ti 含量进行了估算。迄今为止, 对月球表面元素、矿物定量探测主要有阿波罗 15、16 号, Lunar Prospector 携带的伽马射线谱仪 (GRS) 以及 Clementine 携带的成像光谱仪 (UVVIS)。但阿波罗 15、16 号探测的数据质量、精度、覆盖区域、有效探测元素的种类都有限, 与 GRS 数据和 UVVIS 反射光谱 (CSR) 数据有相当大的差距。月球研究者们都把目光投向了这两种数据, 近年来关于月球元素含量、岩石分布等的最新成果大都来源于这两种数据的分析、处理与信息提取。

众所周知, 月球富含大量的资源, 其中很多对地球上的经济活动具有重要的意义。通过对月海玄武岩体积的粗略估算, 推测月球上钛铁矿的总资源量为 $(1100 \sim 2200) \times 10^{12}$ t。月球还富含克里普 (KREEP) 玄武岩和稀土元素钍 (Th)、铀 (U) 等资源。克里普玄武岩是高地三大岩石类型之一, 因富含 K (钾)、REE (稀土元素) 和 P (磷) 而得名。根据粗略估计, 仅在风暴洋区 KREEP 中的总稀土元素资源量为 $(225 \sim 450) \times 10^8$ t。月球还蕴藏着丰富的铬、镍、钠、镁、硅、铜等金属矿产资源, 都是极具开发利用前景的重要资源。此外, 月壤中还富含稀有气体元素, 其中可控核聚变燃料氦-3 ($\text{He}-3$) 大量存在于其中。用氦-3 来进行核聚变反应产生的能量更大且放射性损伤易于防护。而地球上可提取的氦-3 是非常少的, 只有 $10 \sim 20$ t。对于月球的实测结果计算表明, 月壤中氦的资源量可达 $(100 \sim 500) \times 10^4$ t, 可供地球使用约 10000a 以上。

当今探月热潮中, 美国发射的克莱门汀 (Clementine) 号探测器和月球探测者 (Lunar Prospector) 探测器所取回的数据应用比较广泛, 为目前遥感探月工作的主要数据源。Clementine 号探测器于 1994 年 1 月 25 日发射, 它携带的仪器有紫外/可见光相机、近红外相机、长波红外相机、高分辨率相机、恒星追踪相机、激光测高仪、带电粒子探测器。其中紫外-红外区间的多波段成像仪、激光测距仪以及带电粒子检测器, 用以研究月表的矿物学特征、地形及其他科学课题。Clementine 探测器是 Apollo 系列探测活动结束后, 第一次内容比较广泛的探测活动, 取得了大量的高分辨率、高精度探测数据。其中多波段成像仪的探测数据被用来研究某些元素的全球分布, 获取了元素钛和铁的含量分布图。Lunar Prospector (LP) 探测器主要目的是探测月表成分, 研究磁场与重力场, 尤其是探测南极冰是否存在。LP 在 1998 年 1 月 7 日发射, 1 月 16 日开始工作, 并持续了 1a。LP 携带了 5 种科学仪器: 伽马谱仪 (GRS), 中子谱仪 (NS), α 粒子谱仪 (APS), 磁场计

(MAG), 以及电子反射计 (ER)。伽马谱仪是为了提供全球的表面至表面下 20cm 的元素组成, 期望能探测铁、钛、铀、钍、钾和硅, 另外希望探测到铝和钙, 它有 512 个能量通道。中子谱仪是为了探测月表, 尤其是两极永久阴影坑 50cm 深度内的水冰分布, 另外一个目标是探测太阳风注射到月壤 50cm 深度的氢原子丰度图, 并由此制作月壤成熟度图。 α 粒子谱仪是为了寻找月表排气事件。目前公布的 LP 数据中有 3 个处理层次, 分别为 Level0, Level1 和 Level2。Level0 数据是原始数据, 只做过简单的处理, 即把真实时间添加上去, 这种数据很少使用。Level1 数据是应用最广泛的数据, 它可以用来提取某种元素分布信息。Level2 数据目前尚未处理完。已公布的 Level1 数据是 CDF (common data format) 格式, 它可以提供某种元素的分布信息。例如, 如果想得到跃迁值在 2.2MeV 的元素的分布情况图, 那么首先需要知道该能量跃迁值位于 123 频道, 然后抽取该频道的计量值, 最后用 IDL 程序 (make_grid.pro) 展示出来即可。月亮女神探测器于 2007 年 9 月 14 日利用 H-IIA 火箭成功发射, 2009 年 6 月 11 日受控撞击月球表面。该计划包括 1 颗主探测器和 2 颗子探测器, 共配置了 15 台 (套) 有效载荷, 开展对月球的综合性、全球性的普查探测, 并围绕月球形貌、表面物质组成、磁场、重力场等关键科学问题, 凝练、提出科学目标并配置有效载荷; 有效载荷研制在方案设计、元器件选型等方面均有所创新, 如有效载荷的功耗、质量、探测精度等技术。2010 年 10 月 1 日 18 时 59 分 57 秒, 长征三号丙运载火箭顶着嫦娥二号从西昌发射中心拔地而起, 一举把后者直接送入奔月轨道, 表明我国成功发射了第二个深空探测器, 将我国探月工程又向前推进了一步。

由此可见, 遥感图像在探月工程中扮演着重要的角色。同时, 大量资料显示: 我们不仅可以利用遥感测图技术所获取的月球表面三维影像, 精细划分月球表面的地貌单元, 编制月球三维地形图、地质图和专题要素图; 还可以进行月球表面撞击坑的形态、大小、分布、密度等的研究; 而且还能划分月球断裂和环形影像纲要图, 为探索月球和月球基地的建设提供基础信息。

嫦娥一号是我国发射的第一个月球轨道探测器, 是中国月球探测工程“绕”、“落”、“回”发展战略的第一步。嫦娥一号于 2007 年 10 月 24 日在西昌卫星发射中心成功发射, 2009 年 3 月 1 日受控落月于 52.36°E、1.50°S 的丰富海区域, 在轨运行 495d, 比预期 1a 的工作寿命延长 4 个多月 (欧阳自远等, 2010)。

嫦娥一号卫星在长达 1 年半的运行期间获得了 1.37TB 的原始科学数据, 在此基础上目前已生产出约 4TB 的科学应用数据产品。这些数据为开展月球地质和月球演化综合研究提供了珍贵的第一手资料。另外, 国际上, 特别是美国等国家公布的月球遥感数据及其产品也为我国进行数字地质编图工作提供了重要的参考价值。因此, 利用多源数据, 并结合 GIS 等高新技术进行我国首次月球地质编图技术与方法研究, 从中探索并总结出一套成熟的月球等行星地质编图技术、规范和标准, 是此次地质编图工作的重中之重。从总体上来说, 编图资料主要包括基础图件、辅助数据和补充资料。基础图件为此次编图工作的底图资料, 也是以嫦娥一号 CCD 影像图为基础的; 辅助数据是在进行编图过程中重要的参考资料, 也是划分地质单元、区分物质成分指标性参考数据; 补充资料是地质编图工作中必不可少的参考资料, 可以用来对成果数据进行补充说明和与国际上目前存在的地质编图成果进行对比, 以验证其有效性。

我国的嫦娥一号卫星携带了干涉成像光谱仪、 γ /X 射线谱仪对月表 24 种元素的含量

和分布进行探测,携带微波辐射仪对月球的土壤厚度进行估算。干涉成像光谱仪波谱范围为 $0.48\sim 0.96\mu\text{m}$,共设32个波段,空间分辨率约200m,它与 γ 射线谱仪一起将对月表24种元素含量和分布进行探测; γ /X射线谱仪主要用于元素含量的探测,可以检测射线的能量范围为 $0.3\sim 9.0\text{MeV}$,仪器能量分辨率9.0% (662keV),数据速率10kbps,可以观测Fe、U、Ti等元素;在1a探测周期内可以保证的元素为U、Th、K、Ti、Fe、Al、O;基本可以探测到的元素为Si、Na、Mg、Ca、H;可能探测到的元素为Gd、Mn、Cr;X射线谱仪与 γ 射线谱仪的原理一样,但探测的范围为 $0.5\sim 60\text{keV}$,与 γ 射线谱仪形成互补;微波辐射仪主要用于探测月球土壤的厚度,从而估算氦-3的含量,微波辐射仪用3、7.8、19.35、35.37GHz来接收月表的辐射强度,换算成月表的辐射亮度温度,温度分辨率为0.5K。微波辐射仪是我国首次用来进行月壤厚度的探测。随着我国自主探月卫星的升空,我国学者已经从理论上的探讨转为直接对嫦娥卫星数据的分析、月球资源信息提取的实践上来。截至目前,利用嫦娥一号载荷获取的各种数据已经产生了“全月球影像图”、“全月球DEM数字地形图”、部分元素“全月球分布图”或“区域分布图”、局部“地貌类型与特征图”等成果。其中“全月球影像图”实现了月面的全覆盖,是当今国际上数据覆盖最全、数据一致性最高、图像质量最好、定位精度最高的全月球影像图,完全可以作为新的月球基础地图。丰富的数据源势必会引发月球遥感信息研究的高潮,大大促进人类对月球资源的了解。

1.2 目的与意义

月球地质背景是研究月球起源和演化模型的重要信息,月球的起源与地球的起源存在密切关系。根据月球岩石同位素年龄测定,发现月球的年龄和地球一样,为44亿~46亿a(欧阳自远等,2005)。研究月面历史的分期及其与地史分期的对比,对了解太阳系的起源和演化有重要意义。

人类研究月球已经有几十年的历史了,这期间对月球的物质组成、重力和形态学等研究已经有了长足的进展。但是对于月球的地质状况和演化发展还了解甚少。月球研究与地球科学是密不可分的,无论是在地球地质科学,还是在行星地质科学中,构造地质学都是极其重要的一个基础分支。在地球上,构造地质学研究地壳的岩石、岩层和岩体在岩石圈中力的作用下变形形成的各种构造现象,以及这些构造的几何形态、组合形式、形成机制和演化进程,探讨产生这些构造的作用力的方向、方式和性质。通过对构造地质的研究,我们可以掌握不同尺度构造运动发生、发展、终止的过程,以及它们对地球地貌、矿产资源、环境等所产生的影响。而在以月球研究为代表的行星地质学中,虽然在研究方式和手段上有很大的区别,但是通过对行星表面构造现象的研究同样有助于我们对行星形成演化的了解和月球整体格架的认识,这对于月球地质状况研究起到方向性指引的作用,重要性不言而喻。因此,我们需要编制月表构造纲要图,重新厘定月球构造事件序列与演化,建立月表构造区划原则与规范,这项工作具有重要的科研意义,能够为未来我国的月球探测和开发奠定坚实的科学基础。

月球起源模型是奠定其地质格架的基础,演化历史是指导月球地质编图的基本框架,

将直接指导月球岩石类型、地质单元、构造、地层时代的划分。月球地质编图是嫦娥一号探测数据深化利用的重要工作,是探测数据的科学应用与研究是探月工程的重要组成部分。嫦娥一号卫星搭载了8台(套)有效载荷,获得了月球影像、地形高程、元素含量、光谱信息、空间环境等多种探测数据,已经取得了初步应用成果。开展月球地质编图工作,可以深化对嫦娥一号科学探测数据的利用,充分挖掘这些探测数据的科学价值。人类对月球的认识是逐步深化的过程。通过60a的各类月球探测,已经积累了有关月球的表面形貌、地质背景、物质组成、内部结构和表面环境等的大量资料。综合国内外月球探测、月球样品和月球陨石研究、月球地质研究等研究成果,通过新的月球地质图集成展示月球科学的大量成果。月球地质图和月球大地构造纲要图可以用来对月球矿产资源进行调查研究,评估矿产资源分布和储量,对未来月球矿产资源勘查和开发利用有重要的参考价值;对我国探月二期工程的着陆场选择,探月三期工程的采样点选择和月球样品的实验室研究具有重要参考价值;对未来载人登月和月球基地选址、建设方案优选也具借鉴意义。本书所介绍的月球地质编图是在前人已有认识的基础上,建立我国月球地质图件标准与规范,为完成全月面地质图的编制奠定基础。

1.3 本书章节说明

本书系统地介绍了月球大地构造纲要图与地质图编制方案,介绍整个编图系统工程的设计方案,从开展月球数字地质编图的目的、意义和在月球数字地质编图工作中所建立的编图方案和遵循参考的引用标准,到前期的数据资料收集和准备工作,并建立月球编图数据源信息分类;在充分调研国内外月球地质编图的基础上,开展基于构造要素、物质类型、构造单元、地层时代的分类、演化成因分析和分别确立不同单元类型的划分方法,并完成相关要素的结构设计,建立月球地质编图标准。而后,在GIS数字化环境下完成大地构造纲要图与地质图的建库和制图任务,最终进行成图整饰并出图。

第1章,绪论,论述本书进行月球地质编图的目的与意义,概括地质编图工作在现有探测成果集成和未来科学应用方面的重要意义。第2章,国内外月球地质编图进展,详细介绍了国内外月球地质编图的历史和进展情况,并概述了国际上最新开展的有关月球地质编图情况,以及对月球地质编图工作直观的认识。第3章,月球地质编图使用的数据,作为月球数字地质编图的重要参考数据,此部分归纳了在地质编图中各部分编图环节所使用的数据来源、用途、传感器类型等信息,以及它们分别在地质编图中起到怎样的作用。第4章,嫦娥探月数据研究,对我国首次探月所搭载的CCD、IIM、LAM数据做了系统的分析与运用。第5章,数字探月研究,运用数字化的方式研究月球构造现象,构造一个三维数字月球。第6章和第7章分别对月球地质图和月球构造纲要图的编图思路、编图原则、编图使用数据、构造要素提取与使用、构造单元划分进行了详细论述,并对构造、岩石和月表物质类型提取与方法及地层划分等进行了描述;对这些构造类型、地质单元和地层关系在地质图中的表现形式分门别类予以整理列出,特别是将地质要素解译标志和划分方法涵盖其中,对地质图与构造图关系也做出了基本定义。第8章,数字地质编图规范标准,重点介绍在整个月球地质编图系统工程实施过程中所遵循和参考、引用规范与标准,

以及编图格式、坐标系、图例等。第 9 章，月球典型区域研究，根据对我国月球地质编图典型区域的选取，编制出虹湾及其周缘地区图幅（地质图、构造纲要图），首次针对地外天体进行地质编图所选取的典型区域概况进行论述，内容包括地形、地貌与地质、区域构造演化分析等，这是我国第一幅月球构造纲要图与第一幅月球地质图。第 10 章，月球地质编图与月球探索成果空间数据库，介绍了月球地质编图的建库流程和方案设计，包括建库之前的投影、比例尺等数学基础设计和空间数据库要素设计，以及建库的技术流程、质量控制和出图整饰等内容。第 11 章，结束语。最后部分为参考文献。

在本书编写过程中，参与了大量工作并付出辛勤劳动的人员还有：颜丹平、刘少锋、王敏沛、李珂、魏蔚、奚晓旭、韩同林、俞天石、何姝珺、刘洪利、孟溪、李智强、田辉、王楠、付渊博、姚美娟等，在此一并致以崇高的谢意！

2 国内外月球地质编图进展

2.1 月球构造图编图进展

目前,人类对月球地质构造的认识完全是基于对全月球小比例尺遥感影像的解译,因而存在难以确定的多解性。且由于月球的地质演化历史与地球有较大的差异,采回的月球样本也十分稀少,代表性非常不足,因此月球构造框架的编写如果运用地球上的构造框架显然不是十分合理。目前月球构造纲要图的划分判定现在仍然没有一个统一的理论和框架确立。

月球大范围宏观地质构造理论的分析工作,曾经经历了几个时期的摸索。当地球的槽-台学说盛行时,曾按照槽-台学说划分月球构造纲要单元;当地球的板块构造学说盛行时,又按地体的思路划分月球的构造单元。1967年霍达克在《月球的全球构造》一文中分析了月面上山脉、月谷、裂隙等的性质和位置,指出了一些重要的大型断裂,是一次比较全面的对月球全球构造进行的研究;分析了月面上主要的构造单元,提出了月球主要构造单元的形成和发展历史,并绘制了全月构造简图。1977年, Melosh 将月球表面划分为赤道逆冲断层带、中纬度走滑断层带和极地正断层带,并将这种现象归结于潮汐力。1978年, Raitala 对风暴洋西南的湿海 (Mare Humorum) 附近的构造域进行了研究,并结合地震资料对该地区的地质活动进行了推论。利用 Clementine 卫星和 lunar Prospector 卫星的 γ 射线数据, Jollioff et al (2000) 对月球表面进行了填图,并依据填图的结果,将全月的地体构造划分为三类。但是, Jollioff et al 关于月球地体单元的划分,也仅仅是依据月球某些化学元素的遥感探测并结合少量样品的精细研究做出的推测。关于月球构造纲要的区划、地体单元的厘定、断裂与环形构造的分布等,仍然缺乏实地的验证。世界上对月球的研究制图已经正式出版的主要是月球地质图,其主要反映月球时代-地层信息。而带有各类构造单元信息的专门的大地构造分区图目前还没有见到公开发表的成果,只存在少量的构造简图。关于以突出月球构造信息为目的的月球构造图只有少量的简图。1967—1968年,苏联科学家科兹洛夫和苏利季-康德拉季耶夫 (Козлов В В, иСулиди - Кондратьев Е д, 1967, 1968) 对月面构造单元进行了划分 (图 2.1), 一级构造单元为高地构造区域和月海构造区域,在这两个一级构造单元中,又划分了二级构造单元,即高地构造区域: ①广阔的大陆区; ②由山链构成的边缘隆起; ③巨大的内陆和边缘盆地 (类月海); ④最大的环形构造 (亚类月海)。月海构造区域: ①巨型月海盆地的边缘带和小月海盆地; ②巨型月海的内带。

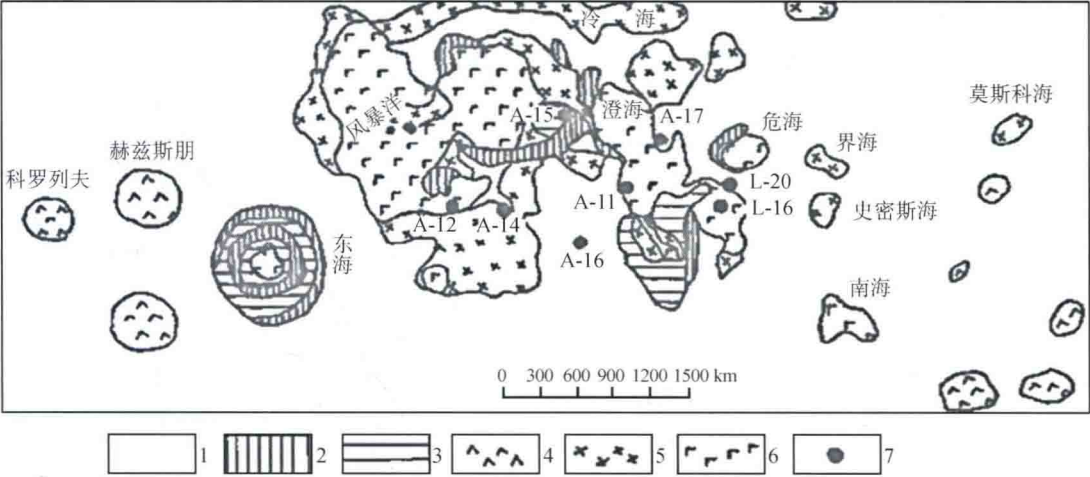


图 2.1 月球主要构造单元简图

(据 Козлов В В, и Сулиди - Кондратьев Е д, 1967, 1968)

1. 广阔的大陆区；
2. 由山链构成的边缘隆起；
3. 巨大的内陆和边缘盆地，即类月海；
4. 最大的环形构造（或亚类月海）；
5. 巨型月海盆地的边缘带和小月海盆地；
6. 巨型月海盆地的内部；
7. 登月点

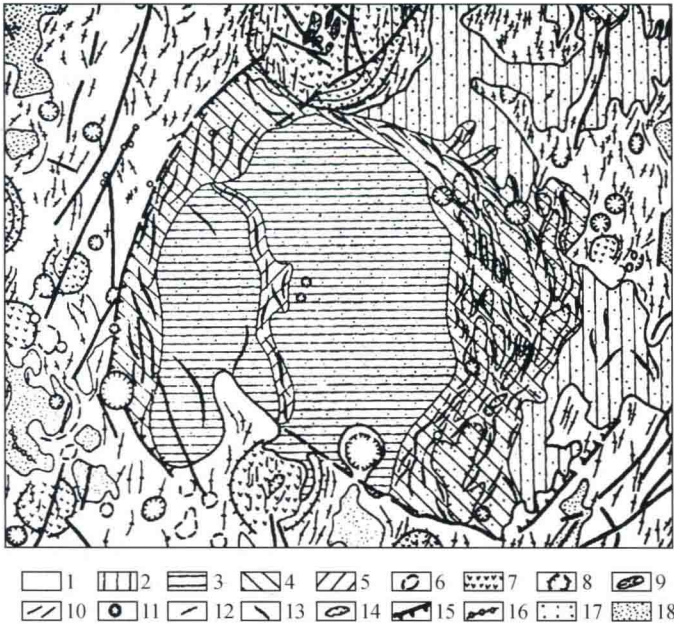


图 2.2 湿海及其周围高地构造图

(据 Козлов В В, и Сулиди - Кондратьев Е д, 1967; 引自欧阳自远等, 2005)

1. 大陆区域；
2. 陆缘带；
3. 月海内带；
4. 边缘堤形隆起；
5. 海中堤形隆起；
6. 托勒玫纪以前的环形构造；
7. 托勒玫纪的环形构造；
8. 托勒玫纪的环形构造的堤；
9. 中央峰和山岭；
10. 环形构造底面上的山脊；
11. 后月海期的环形构造；
12. 大陆范围内的山脊；
13. 堤形隆起范围内的山冈；
14. 山冈间的低地（向斜）；
15. 断裂破坏（齿间面向下降的地块，虚线表示推测线）；
16. 由位于断裂线上的小撞击坑组成的小链；
17. 月海盆地中熔岩物质（玄武岩）分布的区域；
18. 月球高地上局部盆地和海湾中熔岩物质（玄武岩）分布的区域

1967 年，科兹洛夫和苏利季-康德拉季耶夫绘制的湿海及其周围高地构造图，对月面各种构造单元做了更详尽的分类（图 2.2）。奥基夫（O'Keefe, 1969）对月球正面中央部

分重力测量的结果表明,高地区域月亮厚度为 40~60km,而在月海区域内月亮的厚度变薄到 20km 以下。在月海区和高地区之间的过渡区域,包括巨大的内陆和边缘盆地(类月海海边或陆缘地区),月亮的厚度介于两者厚度之间,30~40km。科兹洛夫和苏利季-康德拉季耶夫(1968)根据这一结果,对月球构造划分了三类:大陆型月亮地段(月亮厚 40~60km);海洋型月亮地段(20km 以下);过渡型月亮地段(30~40km)。霍达克(1967)在其《月球的全球构造》一文中,分析了月面上山脉、撞击坑、月谷、裂隙等性质和位置,参考了已有的月面等高测量资料,提出了月球最主要的构造单元及其形成和发展的历史,并绘制了月球构造简图(图 2.3)。



图 2.3 全月构造简图

(据 ХолакЮ А, 1967; 引自欧阳自远等, 2005)

1. 深大断裂和其他断裂; 2. 洼地构造-月海; 3. 山脉和隆起的走向; 4. 最主要的环形构造和月坑;
5. 最主要的隆起带

从图 2.3 中可以看出,大陆和月海带是月球上的一级构造单元。大陆是月面上隆起的古老基底,月海则是下沉的、叠加在基底构造上的洼陷。在高地上还划分了许多近南北向为主的隆起带。通过整个月面可以追索到南西、北东、南北和相近方向上的几组线型深大断裂。

Ruth Ziethe et al 通过对比月球玄武岩的三维对流模型, 获得了月球火山喷发的持续时间和范围。通过几种热演化模型, 在不同的边界条件下, 评估了除月球内部熔融层外的边界寿命。英国的 Guest 和 Fielder 通过环绕月球的探测器来观测月球上具体的低壁月球环, 用来证明它们是近期的火山构造。这使得另外一种认定这种基础环形构造是古老的、部分被掩埋在陨击坑的说法遭到了挑战。他们通过观察这些基本环状构造的分布和形成机制使其产生了假设, 即月球上有两种类型的表面: 一种基本上由熔岩流生成, 而另一种是

夹杂着熔岩的熔结凝灰岩。1994年,美国发射了Clementine探月卫星,随后公布了Clementine的影像数据,其中UV/VIS(紫外-可见光)和NIR(近红外)两类数据被全球月球工作者所广泛使用,并发表了大量成果。如Lucey et al(2000)基于阿波罗采集的月壤样品和Clementine数据特点,提出了使用波段比值运算的方法,计算月壤光学成熟度、 TiO_2 、 FeO 含量等。Ralph B. Baldwin(2002)通过研究与大型月球陨击坑同心的环状构造提出海啸起源模型。国内的黄倩等(2009)利用嫦娥一号激光高度计探测数据获得的高精度月球地形模型CLTM-s01,结合月球全球重力场分布情况,提出月球表面4个新的地形特征,分别是:位于背面的类撞击盆地Sternfeld-Lewis,撞击盆地Fitzgerald-Jackson,撞击坑Wugang和正面的火山沉积高地Yutu;同时,对以往被提议的一些大尺度撞击盆地的地形特征进行了分析和论证,并根据盆地特征划分了不同的盆地等级。

以上这些研究使我们对全月球的构造框架有了一些轮廓性的认识,但是由于受到影像分辨率和资料丰富程度等的限制,这些研究工作多少有一些片面性。本课题组综合前人研究成果,将要编制的月球构造纲要图是以月球构造分类和统计为基础的,该图应包括以下信息:

1) 月表线性构造。包括月岭、月溪、地堑、各种断裂、撞击坑辐射线构造以及月球高地的山脉和月海地区的海岭,这些都是月球地质活动的直接证据。

2) 月表环形构造。环形构造是月表的主要构造形态,包括撞击坑、穹窿构造和火山口。另外一些呈现环形的月海盆地也可能和小天体撞击有关。从影像上区分这些不同成因的环形构造是编制月球大地构造纲要图的一项重要内容。

3) 月球地体构造。月亮可以划分为3个大型地体,即:①风暴洋克里普地体(PKT),②斜长质高地地体(FHT),③南极爱特肯地体(SPAT)。但这仅仅是为一些重要的观测资料和推论提供素材,是对月球勘探者号和克莱门汀号探测器所获取的全月球表面地球化学数据的粗略处理结果,随着探测水平的提高,相信会有更为详细的月球地体被划分出来。

4) 盆地构造。大型撞击盆地是月球表面一种重要的地形,代表着非常重要的时间标志,为认识月球的早期历史提供了重要的线索,并控制着月球上总体的构造格架。

5) 时代划分。月面历史(history of lunar surface)是研究月球表面月球地质演化的历史。

6) 物质成分划分。美国20世纪70年代编制的月球地质图根据物质的成因,将月表的物质划分为坑物质(crater materials)、高地物质(terra, plateau, and dome materials)、月海物质(dark materials)、环形盆地物质(circumbasin materials)等4种类型。每种类型的物质还可根据反照率、表面结构特征、构造产出位置进行次级物质单元细分。

7) 构造单元划分。根据月球区域地形地貌特征、影像特征、化学成分特征以及各类构造要素的配套,体现区域总体构造格架。

本次研究计划采用的方案,以不同的模式、不同的流程、不同的数据源和高度的软件集成性,对全月各种不同类型地貌的区域进行自动处理,在保证识别效果的前提下,由具有专业知识的人对软件进行指导,在某种意义上已经具有了“专家系统”的特点。这不仅仅对本次课题是直接的支持,而且相信会对以后我国将开展的探月二期、三期工程,甚至未来的火星研究,都将是一种重要的技术和经验积累。由于目前国外主要以编制月球地质图(1:500万)为主,专门的月球大地构造图还没有公开发表,因此本课题组将要编制的1:250万月球大地构造纲要图(虹湾幅),无疑是具有重要意义的。而1:1000万的尺度,基本可以反映月表存在的中大型(尺度在10km左右/1mm)盆地、冲击坑、火山口、

断裂、山脉、月谷、月溪和地体等主要月球构造元素。如 Alpine 月谷（长约 130km，宽 10km）、雨海东部边缘的某一直壁（岩墙，长约 120km，宽 12km）、Hyginus 月坑（直径 11km，并且明显地改变了 Hyginus 月溪的走向）、风暴洋中部的 Aristarchus 月坑（直径 40km，是复杂月坑的典型实例）、风暴洋中部 Marius 山区的火山穹丘（该区部分宽阔火山穹丘宽度可达 10km）、北西风暴洋中的 Rumker 山丘（它可能是火山复合体，是一个不规则的大台地，宽约 70km），还有大量大型月坑半径都在 20km 以上；以上所有这些与月球地质演化有关的构造现象，都会在本课题组将要编制的大地构造纲要图上得以体现。

我国开展月球探测的时间相对较晚，但随着嫦娥一号的成功发射，我国已经拥有了自主的原始数据，可以开展编制月球地质构造图的工作。依据月表地形地貌特征、矿物组分分布、线性构造、环形构造划分月表构造单元并与时代信息结合见流程图，编制月球典型区域大地构造纲要图，并厘定月表典型区域构造演化序列。结合这一成果，我国将有可能对月球的构造演化过程提出更新的认识，为月球科学的发展做出重大贡献。

2.2 月球地质图编图进展

月球地质图（the geological map of the Moon），又称月面地质图、月面地质分区图，是表示月球表面不同时代、不同类型的物质分布特征的平面图。应包括地质背景、构造类型、地层时代、物质单元等信息。月壤成熟度、月球表面的岩石类型、元素分布、矿物含量等信息是划分月球地质单元的重要参考依据。

月球地质图的编制历史已经长达 400 年。最早始于 Gilbert 于 1600 年左右用望远镜观测结果制作的地质图。到 20 世纪 60 年代，随着一系列空间探测器对月球的观测，人类对月球的认识更加深入，曾先后编制了月球地形图、地质图、构造图等。1962~1974 年，美国地质调查局（USGS）利用 Lunar Orbiter 的影像图，把整个月球正面划分为 44 个区域，编制了 44 幅比例尺为 1:100 万的区域地质图（图 2.4，图 2.5）；在此基础上，编制完成了比例尺为 1:500 万的月球正面地质图（Wilhelms et al, 1971）（图 2.6）。之后又继续编制了月球西部地质图（Scott et al, 1977）（图 2.7）、东部地质图（Wilhelms et al, 1977）（图 2.8）、北极地区地质图（Lucchitta, 1978）（图 2.9）、南极地区地质图（Wilhelms et al, 1979）（图 2.10）、背面中部地质图（Stuart-Alexander, 1978）（图 2.11），从而完成了第一版全月球地质图的编制工作。Wilhelms 和 McCauley 的月球地质编图工作具有重要的开创意义，是对阿波罗时代月球地质研究成果的一种总结。与此同时，美国地质调查局还编制了 1:25 万、1:10 万、1:5 万、1:2.5 万、1:1 万和 1:5000 等 6 种比例尺的典型地区或阿波罗（Apollo）着陆区地质图，反映了月球地质研究程度的不断提高。1976~1994 年，月球探测活动进入以资料消化、分析和综合研究阶段，月球地质编图以大范围综合集成研究和小比例尺地质图编制为主。1994 年开始，美国开始了重返月球计划，相继发射了“Clementine”（1994）和“Lunar Prospector”（1998）等月球探测器，对月球形貌、资源、能源和水冰等进行了探测。美国地质调查局（2002）在行星地质图编图年会上又提出了将实施新一版 1:250 万月球地质图的编制计划，按统一的比例尺、投影方式，并将全月球划分为 30 个图幅区域（图 2.12）。纬度 30°~60°采用兰伯特正形圆